

# CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO REALIZADOS EM LABORATÓRIO<sup>1</sup>

*Leandro Almeida Dutra<sup>2</sup>  
Antônio Cesar Bozzi<sup>3</sup>  
José Daniel Biasoli de Mello<sup>4</sup>  
Cherlio Scandian<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Nesse trabalho, verificou-se a correlação entre os resultados de taxas de desgaste obtidos entre três ensaios abrasivos distintos: um representado um mono-evento abrasivo – esclerometria pendular, o segundo representado um ensaio a dois corpos – pino-lixo e, finalmente, o terceiro a três corpos – ensaio LTM. Foram comparadas oito ligas, sendo três ligas de ferro fundido branco alto cromo e cinco ligas de alumínio-silício. A relação entre os ensaios, materiais e taxas de desgaste foi, então, observada. Verificou-se que o ensaio de esclerometria pendular é inversamente relacionado com os resultados do ensaio pino-lixo, apesar de serem aparatos que produzem, a priori, eventos severos. Verificou-se, também, uma correlação direta entre o ensaio LTM e o ensaio de esclerometria pendular.

**Palavras-chave:** Desgaste abrasivo; Correlação; Taxa de desgaste.

## **CORRELATION AMONG ABRASIVE WEAR TESTS DONE IN LABORATORY**

### **Abstract**

In this study, it was observed the wear rate correlation of three severe abrasive wear tests. Eight alloys, three chromium white cast irons and five aluminum-silicon alloys were tested in three different severe abrasive wear tests. The first test, represents a single abrasive event - single-pass pendulum, the second, represents a two body abrasive wear test - pin-on-disk, and the third represents a three body abrasive wear test - LTM test. The correlation among this tests, materials and wear rates were then observed. It was verified that the single-pass pendulum test has a negative correlation with the pin-on-disk test although both represent, at first, severe events. It was also verified that the LTM test has a positive correlation with the single-pass pendulum.

**Key words:** Abrasive wear; Correlation; Wear rate.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, UFES.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, Professor Dr, UFES.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Professor Dr, UFU.*

# 1 INTRODUÇÃO

O desgaste de componentes é a maior barreira encontrada atualmente para o aumento da disponibilidade da indústria. A deterioração de chapas de desgaste, brocas de perfuração, bombas, ciclones, bolas de moinhos, ventiladores e correias transportadoras são típicos eventos causadores de paradas indesejadas para manutenção. Além do custo de sobressalentes, o lucro cessante advindo das paradas contabiliza grandes perdas de faturamento.

O estudo do desgaste abrasivo aplicado à indústria, em especial nos setores de mineração e siderurgia, busca a especificação de materiais que permitam maiores tempos de operação. A seleção de materiais é feita a partir da correlação entre os resultados obtidos em laboratório com os dados coletados em aplicações práticas.<sup>[1-4]</sup> Entretanto, poucos trabalhos têm sido publicados sobre a correlação entre os vários ensaios de desgaste abrasivos realizados em laboratório como, por exemplo, Misra e Finnie<sup>[5]</sup> e Hawk *et al.*<sup>[6]</sup>

O estudo apresentado centraliza as atenções em três ensaios: pino-lixia, largamente citado na literatura, a esclerometria pendular<sup>[7-14]</sup> e ensaio LTM.<sup>[15-17]</sup>

Os ensaios pino-lixia e esclerometria pendular têm sido usados para simular situações de desgaste abrasivo severo,<sup>[3,18]</sup> sendo que a esclerometria pendular representa um mono-evento abrasivo. Já o ensaio LTM simula situações de desgaste abrasivo três corpos menos severos.<sup>[16]</sup>

A correlação entre esses ensaios é apresentada ao longo do estudo. Para possibilitar maiores generalizações dos resultados, foram usados dois materiais polifásicos bem distintos metalurgicamente e em propriedades mecânicas (dureza).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Ligas de ferro fundido branco alto cromo (FFBAC)

A Tabela 1 mostra a composição química, enquanto a Tabela 2 mostra os valores de dureza encontrados.

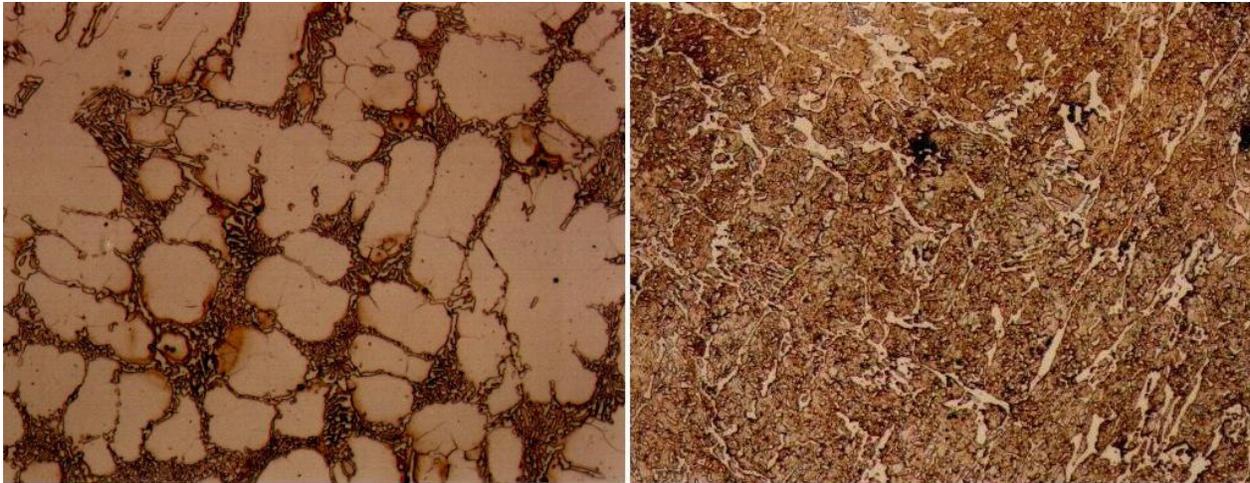
**Tabela 1** - Composição química das ligas de FFBAC.

Amostra	%C	%Cr	%Si	%Ti	%V	%Mo	%P	%S	%Mn
A	1,7-1,8	25-27	0,5-0,7	0,12-0,18	0,15-0,25	0,3-0,5	0,04	0,03	0,7-0,9
B e C	1,4-1,6	25-28	1,25	-	-	-	0,02	0,015	0,8

**Tabela 2** - Valores de dureza das ligas de FFBAC.

Amostra	Dureza [HV]	Desvio padrão
A	450,60	14,31
B	426,60	18,38
C	381,40	11,13

A liga B é apresentada como fundida. A liga C é apresentada após envelhecimento em serviço a 450 °C. A análise metalográfica é apresentada na Figura 1.



**Figura 1** - Análise metalográfica das ligas B (à esquerda) e C (à direita). Reagente Vilella. Aumento 200x.

A liga B apresenta uma microestrutura composta de uma matriz austenítica e um eutético de austenita +  $M_7C_3$ . Já a liga C, apresenta uma matriz ferrítica e predominância de carbonetos secundários  $M_{23}C_6$  precipitados ao longo da matriz.

### 2.1.2 Ligas de alumínio-silício (Al-Si)

A Tabela 3 apresenta a porcentagem de silício nas ligas de Al-Si fundidas com seus respectivos valores de dureza. Os dados foram coletados da literatura.<sup>[19]</sup>

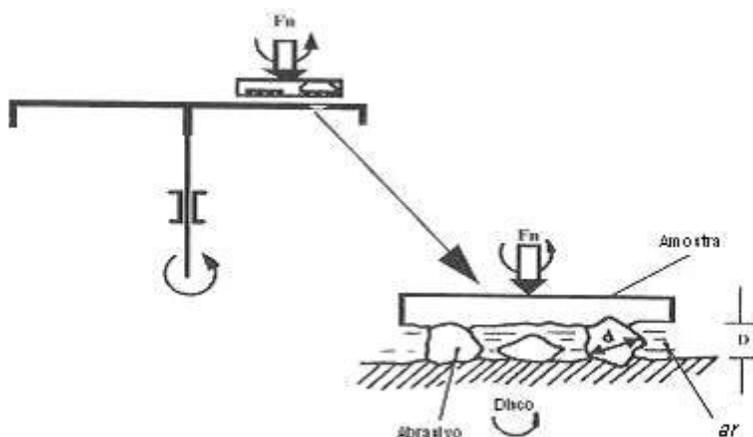
**Tabela 3** - Composição química e valores de dureza das ligas Al-Si.<sup>[19]</sup>

Amostra	%Si	Dureza [HV]
D	0	21
E	5	43
F	9	51
G	12	56
H	16	63
I	21	63

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Ensaio LTM

O ensaio LTM foi desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Caracteriza-se por um ensaio de baixa tensão que pode e produzir mecanismos de deslizamento, rolamento ou mistos. A Figura 2 apresenta o diagrama esquemático do abrasômetro.



**Figura 2** – Diagrama esquemático do Ensaio LTM.  $F_n$  é a força normal,  $d$  é o diâmetro médio do abrasivo e  $D$  é a distância entre o corpo e o contra-corpo.

A configuração do ensaio garante que, ao girar o contra corpo de ferro fundido, o porta-amostra girará no sentido contrário mantendo uma carga constante sobre as amostras. As partículas abrasivas lançadas sobre a superfície do contra corpo entram na interface contra corpo/amostra levando a remoção de matéria da amostra.

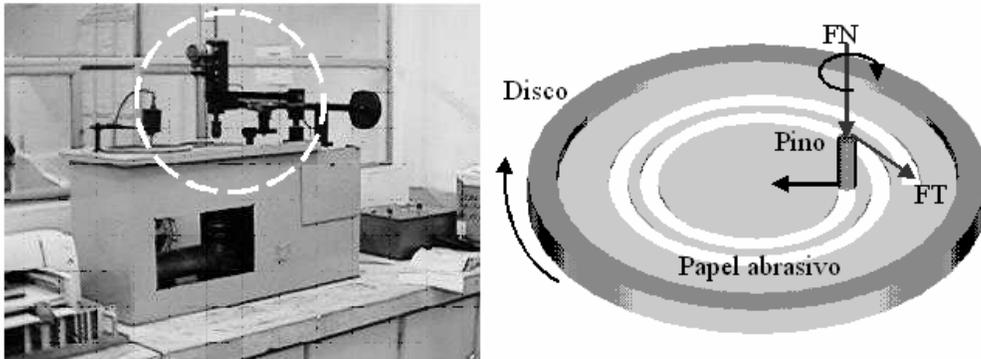
As principais variáveis de controle são: carga normal, fluido da interface, o tamanho, forma e tipo do abrasivo. A Tabela 4 mostra os parâmetros usados nos ensaios da ligas de FFBAC e Al-Si. Como resultado mede-se a taxa de desgaste das amostras.

**Tabela 4** - Parâmetros do Ensaio LTM.

Parâmetros do ensaio	FFBAC	Al-Si <sup>[19]</sup>
Pressão normal (KPa)	30,37	408,28
Abrasivo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Tamanho do abrasivo [μm]	150 a 300	7 ± 3,4
Fluido	ao Ar	Óleo

### 2.2.2 Pino sobre lixa

O aparato pino-lixia é amplamente conhecido. O diagrama esquemático é apresentado na Figura 3. O pino submetido a uma carga normal percorre um espiral de Arquimedes sobre um lixa completamente aderida ao disco e, então, o abrasivo fixo na lixa remove o material do pino. Usualmente o aparato caracteriza micromecanismos de desgaste abrasivo severos.



**Figura 3** – Diagrama esquemático do aparato Pino-lixia. FN é a força normal e FT é a força tangencial.

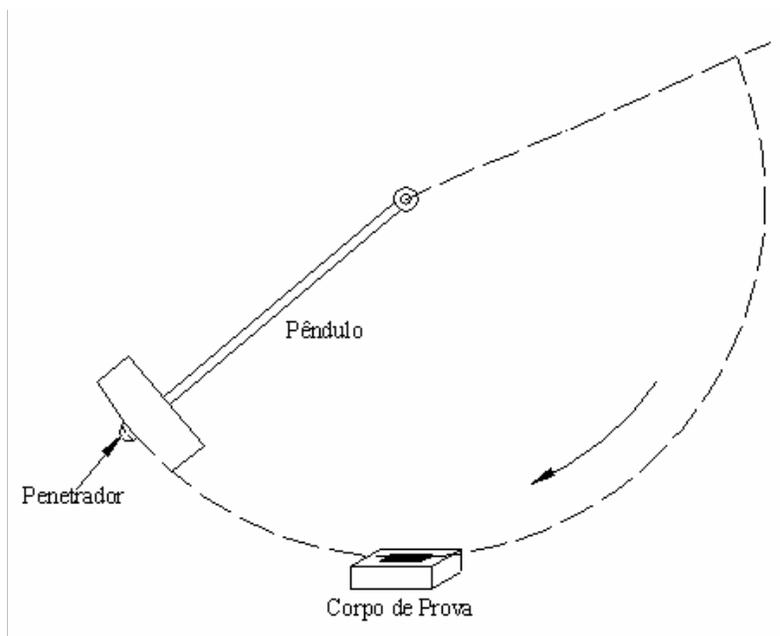
Os parâmetros dos ensaios são apresentados na Tabela 5. Como resultado mede-se a taxa de desgaste das amostras.

**Tabela 5** - Parâmetros do ensaio Pino sobre lixa.

Parâmetros do ensaio	FFBAC	Al-Si <sup>[19]</sup>
Vel. disco[rpm]	25	25
Vel. amostra [rpm]	25	20
Percurso [m]	3,2	3,2
Duração [s]	22	32
Abrasivo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Tamanho do abrasivo [μm]		14,1 ± 8,5

### 2.2.3 Esclerometria pendular

A esclerometria pendular<sup>[7-14]</sup> é uma técnica que simula a ação de um mono-evento abrasivo sobre a superfície de um material. Para simular esse evento, um elemento riscante, penetrador de geometria conhecida, é fixado na extremidade do pêndulo. Este, ao ser liberado, percute sobre a amostra gerando um risco em sua superfície. O diagrama esquemático do aparato é apresentado na Figura 4.



**Figura 4** – Diagrama esquemático do esclerômetro pendular.

A energia de riscamento ( $E$ ) é definida como a energia consumida durante a geração do risco na superfície da amostra. A massa ( $W$ ) é medida pesando-se o cavaco originado após o risco.

Como resultado, calcula-se a energia específica ( $e$ ) definida como a energia necessária para a remoção de uma unidade de massa da amostra.

A Tabela 6 mostra a os resultados do ensaio para as ligas de FFBC e Al-Si. Os dados desse ensaio foram coletados da literatura.<sup>[14,19,21]</sup>

**Tabela 6** - Resultados do ensaio Esclerometria pendular<sup>[14,19,21]</sup>

Resultados do ensaio	FFBC			Al-Si					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
E(J)	2,21	2,29	2,48	0,98	1,36	1,41	1,35	1,18	1,07
W(mg)	2,40	2,50	2,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

### 3 RESULTADOS

Uma vez que o pino-lixo e o ensaio LTM apresentam as taxas de desgaste definidas por massa removida dividido por um denominador, a taxa de desgaste da esclerometria pendular foi avaliada como o inverso da energia específica ( $e^{-1}$ ).

As Figuras 5 e 6 apresentam a variação das taxas de desgaste com a dureza para as ligas de FFBC e para as ligas de Al-Si, respectivamente.

### Variação da taxa de desgaste com a dureza para FFBC

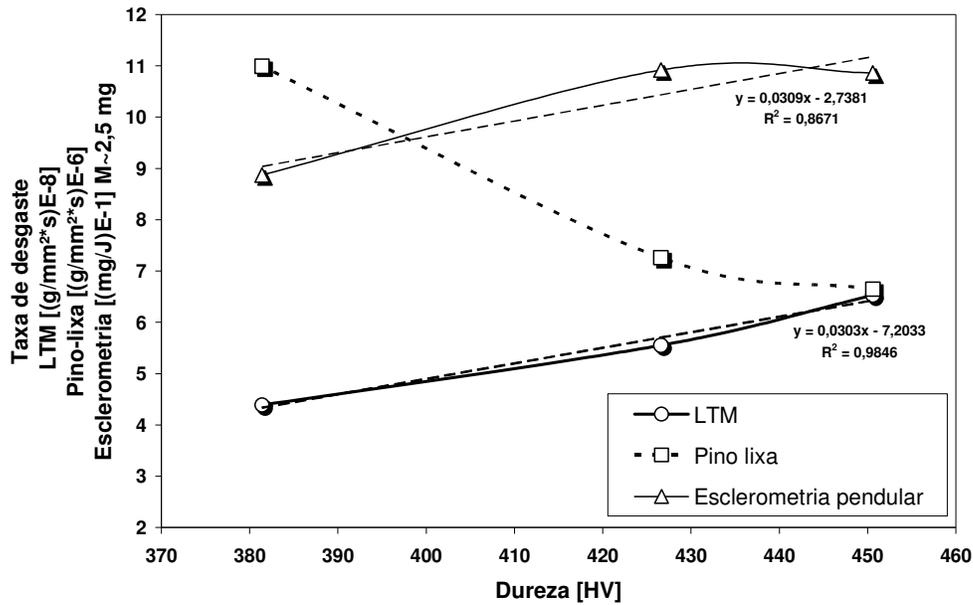


Figura 5 - Variação da taxa de desgaste com a dureza para as ligas de FFBC.

### Variação da taxa de desgaste com a dureza para Al-Si

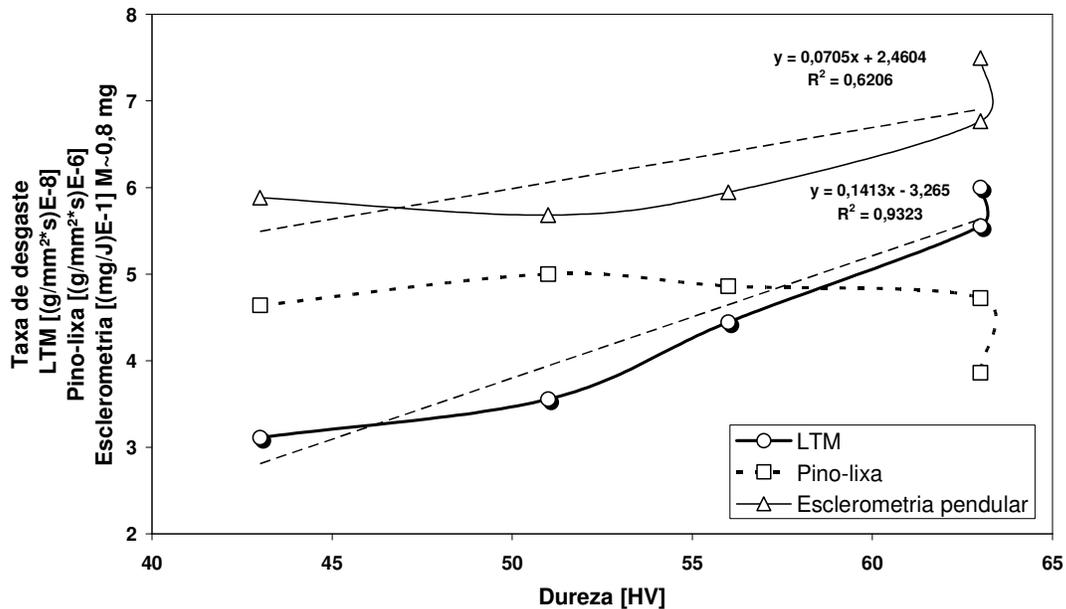


Figura 6 - Variação da taxa de desgaste com a dureza para as ligas de Al-Si.

A correlação encontrada entre os ensaios esclerometria pendular e pino-lixo, para ambos os materiais, é inversa.

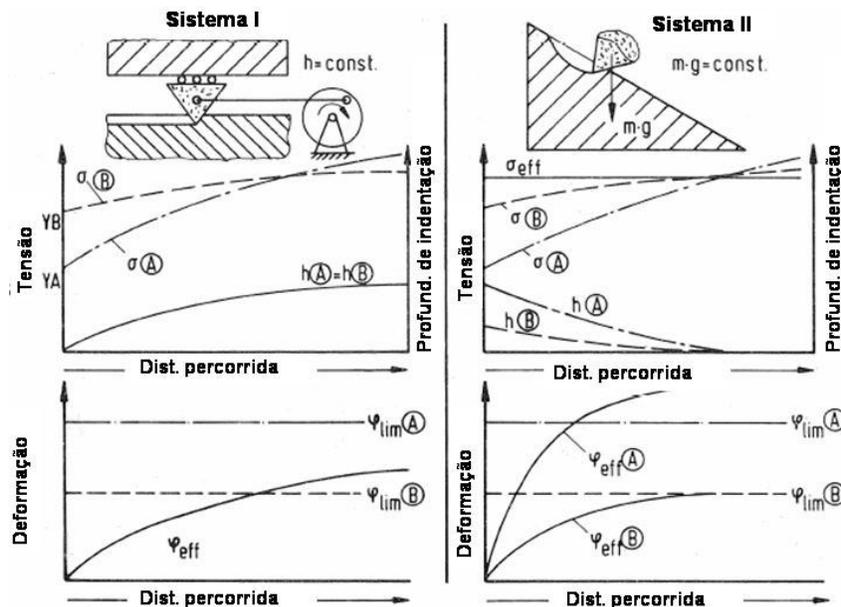
Apesar da esclerometria pendular e do pino-lixo serem ensaios usados para simulação de situações de desgaste abrasivos severos os resultados das taxas de desgaste encontrados não são diretamente correlacionados. Entretanto, a esclerometria pendular correlaciona-se diretamente com o ensaio de desgaste abrasivo a três corpos menos severo, ensaio LTM. Nota-se que a inclinação das duas retas para ambos os materiais seguem a mesma tendência e para os FFBC são muito próximas.

Ressalta-se que, mesmo variando o material, fluido da interface, tipo e tamanho do abrasivo as correlações encontradas obedecem à mesma tendência.

#### 4 DISCUSSÃO

Uma possível explicação para a correlação direta entre a esclerometria pendular e o ensaio LTM e inversa entre a esclerometria pendular e o pino-lixo encontra-se no estudo apresentado por Zum Gahr.<sup>[22]</sup> Este correlacionou a configuração construtiva dos aparatos com a resposta do tribosistema.

A Figura 7 mostra dois sistemas hipotéticos. No sistema I, a distância ( $h$ ) entre o contra corpo e a amostra é mantida constante independente das propriedades dos materiais. Logo a profundidade de indentação da partícula abrasiva é mantida constante e, para isso, o sistema fornece a carga normal necessária à deformação que ocorrerá. No sistema II, a carga normal sobre a partícula abrasiva é limitada e constante, então, as propriedades mecânicas dos materiais, tais como, capacidade de deformação ( $\varphi_{lim}$ ), tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) e encruamento interferem na deformação efetiva ( $\varphi_{eff}$ ). A deformação efetiva pode ser definida como deformação que a partícula abrasiva efetivamente provoca na superfície da amostra.



**Figura 7** – Efeito da capacidade de deformação e do limite de escoamento na taxa de desgaste

Logo, a propriedade mais importante para o aumento da resistência ao desgaste no sistema I é a capacidade de deformação e no sistema II é o limite de escoamento.

A configuração do ensaio pino-lixo assemelha-se ao sistema I, já a configuração dos ensaios LTM e da esclerometria pendular ao sistema II.

## 5 CONCLUSÃO

1. Independente da natureza do material, o ensaio LTM e o ensaio esclerometria pendular são correlacionados diretamente, enquanto que o ensaio pino-lixo e o ensaio esclerometria pendular têm uma correlação inversa.
2. O estudo apresentado por Zum Gahr quanto à configuração construtiva do aparato, altura constante ou carga constante, oferece uma explicação para os resultados encontrados neste trabalho.

## Agradecimentos

Agradecemos aos laboratoristas Ângela Maria (LTM-UFU) e Carlos Alberto Zampieri (TRICORRMAT-UFES) que cooperaram para o desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIA

- 1 BRYGGMAN, U; HOGMARK, S; VINGSBO, O. Prediction of gouging abrasion resistance of steel by pendulum grooving and other laboratory test methods. *Wear*, 115, p. 203-213, 1987.
- 2 BLAU, P. J; Design and validation of laboratory-scale simulation for selecting tribomaterials and surface treatments, *World Tribology Congress (1997)*
- 3 ALBERTIN, E; SINATORA, A. Effect of carbide fraction and matrix microstructure on the wear of cast iron balls tested in a laboratory ball mill. *Wear*, 250, p.492-501, 2001
- 4 STACHOWIAK, G. W; BATCHELOR, A. W; STACHOWIAK, G. B. *Experimental Methods in Tribology; Tribology Series, 44; Elsevier, 1º Edição, 2004.*
- 5 MISRA, A.; FINNIE, I. Correlation between two-body and three-body abrasion and erosion of metals. *Wear*, 68, p.33-39, 1981.
- 6 HAWK, J. A; WILSON, R. D.; TYLCZAK, J. H; DOGAN, O. N. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, 225-229, p. 1031-1042, 1999.
- 7 VINGSBO, O; HOGMARK, S. Single-pass grooving – A technique for abrasive testing. *Wear*, 100, p. 489-502, 1984.
- 8 BRYGGMAN, U; HOGMARK, S; VINGSBO, O. Mechanisms of gouging abrasive wear of steel investigated with the aid of pendulum single-pass grooving. *Wear*, 112, p. 145-162, 1986.
- 9 BRYGGMAN, U; HOGMARK, S; VINGSBO, O. Prediction of gouging abrasion resistance of steel by pendulum grooving and other laboratory test methods. *Wear*, 115, p. 203-213, 1987.
- 10 FRANCO, S. D; MELLO, J. D. B. An investigation of the abrasive wear of Al-Si alloys with the aid of Upsala's pendulum. *Material Science and Engineering*, A154, p. 175-181, 1992.
- 11 JIANG, J; YAO, M; SHENG, F; GAO, X. Dynamical analysis of the wear behavior of steels during the pendulum single particle gouging wear tests. *Wear*, 181-183, p.371-378, 1995.

- 12 LIANG, Y. N; LI, S. Z; LI, D. F; LI, S. Some developments for single-pass pendulum scratching. *Wear*, 199, p.66-73, 1996.
- 13 VELEZ, J. M; TANAKA, D. K; SINATORA, A; TSCHIPTSCHIN, A. P. Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device. *Wear*, 251, p.1315-1319, 2001.
- 14 DEL PIERO, R. C; MELLO, J. D. B; SCANDIAN, C. Resistência ao desgaste abrasivo à quente de ferros fundidos brancos alto cromo utilizado em barras de grelha na sinterização. 59<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 2004.
- 15 COSTA, H. L; PANDOLFELLI, V. C; MELLO, J. D. B. On the abrasive wear of zirconias. *Wear*, 203-204, p. 626-636, 1997.
- 16 AL-RUBAIE, K. S; GOLDENSTEIN, H; MELLO, J. D. B. Three-body abrasion of Al-SiC composites. *Wear*, 225-229, p. 163-173, 1999.
- 17 BOZZI, A. C; MELLO, J. D. B. Wear resistance and wear mechanisms of WC-12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion. *Wear*, 233-235, p. 575-587, 1999.
- 18 ZUM GAHR, Z. H; *Tribology International*, vol. 31, n<sup>o</sup> 10, p. 587-596, 1998
- 19 S. Franco, Contribuição ao estudo do desgaste abrasivo de materiais polifásicos, Universidade Federal de Uberlândia, (1989), Dissertação de mestrado.
- 20 O. Vingsbo and S. Hogmark, *Wear*, 100 (1984) 489
- 21 R. Del Piero, Resistência ao desgaste abrasivo a quente de ferros fundidos branco alto cromo, utilizados em barras de grelha na sinterização, Universidade Federal do Espírito Santo, (2004), Dissertação de mestrado.
- 22 ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and wear materials*. Tribology series 10, Elsevier Science Publishers B. V., 1987.